

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

Д.Н. Морской, В.В. Школа

**Методические указания
к выполнению лабораторных работ по курсу
«Теплофизика двухфазных сред»**



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 4

УДК 536.24
ББК 22.317я7
М80

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/219/book742.html>

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Теплофизика»

*Рекомендовано Учебно-методической комиссией
Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве методических указаний*

Рецензент
канд. техн. наук, доцент *Н.А. Лавров*

Морской, Д. Н.
М80 Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Теплофизика двухфазных сред» / Д. Н. Морской,
В. В. Школа. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана,
2014. — 36, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4084-9

Приведены краткие теоретические сведения, описание экспериментальных установок, порядок проведения лабораторных работ, контрольные вопросы.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих курс «Теплофизика двухфазных сред».

УДК 536.24
ББК 22.317я7

ISBN 978-5-7038-4084-9

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

В курсе «Теплофизика двухфазных сред» рассматриваются вопросы, связанные со спецификой использования парожидкостных сред в технике. Фазовые переходы пар – жидкость (конденсация) и жидкость – пар (кипение) среди всех процессов конвективного теплообмена отличаются наиболее высокими коэффициентами теплоотдачи. Это означает, что температурные напоры становятся минимальными, и поверхности теплообмена можно считать практически изотермическими. Следовательно, используя рассматриваемые процессы, можно обеспечить термостатирование поверхности при заданном тепловом потоке, причем это осуществляется на уровне физического механизма.

Экспериментальные методы являются основными при исследовании теплообмена в двухфазных системах. Данные лабораторные работы знакомят студентов с методами экспериментального определения эффективной теплопроводности тепловой трубы и коэффициентов теплоотдачи при конденсации и кипении.

Лабораторные работы предназначены для студентов 4–5-го курсов, освоивших курсы механики жидкости и газа, теории тепломассообмена.

1. Работа ТП-08. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА

Цель работы — ознакомление с основами теории пленочной конденсации чистого насыщенного пара, освоение методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при конденсации и методики обработки полученных результатов.

Содержание работы.

1. Экспериментальное определение среднего коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации чистого насыщенного неподвижного пара на вертикальной трубе при ламинарном движении пленки конденсата.
2. Обработка полученных результатов и сравнение их с известными теоретическими зависимостями.
3. Оценка погрешностей результатов эксперимента.

1.1. Краткие теоретические сведения

Конденсация пара на твердой поверхности происходит в том случае, когда пар соприкасается с поверхностью, температура которой ниже температуры насыщения пара.

Различают два вида конденсации: пленочную и капельную. Пленочная конденсация происходит, когда жидкость смачивает поверхность и на этой поверхности образуется устойчивая сплошная пленка конденсата. Капельная конденсация наблюдается на несмачиваемой поверхности, причем конденсат образует на поверхности отдельные капли и значительная ее часть не покрыта жидкой фазой.

Вид конденсации влияет на коэффициент теплоотдачи. При пленочной конденсации он значительно меньше, чем при капельной, вследствие того, что сплошная пленка конденсата создает большое термическое сопротивление передаче теплоты от поверхности пленки к охлаждаемой поверхности. В технике наиболее часто встречается пленочная конденсация.

Настоящая работа посвящена изучению пленочной конденсации водяного пара на вертикальной поверхности.

Теория теплообмена при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной стенке впервые разработана Нуссельтом для ламинарного режима движения пленки. Задача была решена при изложенных ниже допущениях.

1. Силы инерции, возникающие в пленке конденсата, пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкости и силами тяжести.

2. Конвективный перенос теплоты в пленке, а также теплопроводность вдоль нее несущественны по сравнению с теплопроводностью поперек пленки.

3. Трение на границе паровой и жидкой фаз равно нулю.

4. Температурный скачок на границе раздела фаз отсутствует, т. е. температура поверхности пленки конденсата равна температуре насыщения при заданном давлении пара.

5. Жидкая фаза имеет постоянные физические свойства, не зависящие от температуры.

6. Плотность конденсата значительно выше плотности пара.

На рис. 1.1 представлена схема образования пленки конденсата.

При принятых допущениях дифференциальные уравнения энергии и движения вязкого конденсата имеют вид

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = 0; \quad (1.1)$$

$$\eta_k \frac{d^2 w_x}{dy^2} = -\rho_k g. \quad (1.2)$$

Здесь T — температура конденсата, К; η_k — динамическая вязкость конденсата, Па·с; w_x — проекция скорости конденсата на ось x , м/с; ρ_k — плотность конденсата, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

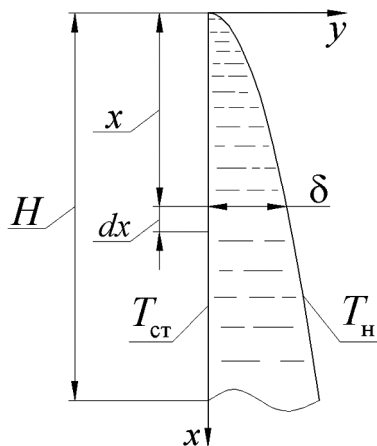


Рис. 1.1. Схема образования пленки конденсата

Граничные условия:

$$\begin{aligned}\delta &= 0 \text{ при } x = 0; \\ T &= T_{\text{ст}}, w_x = 0 \text{ при } y = 0; \\ T &= T_{\text{н}}, \frac{dw_x}{dy} = 0 \text{ при } y = \delta,\end{aligned}$$

где δ — толщина пленки конденсата, м; $T_{\text{ст}}$ — температура стенки, К; $T_{\text{н}}$ — температура насыщения, К.

Интегрируя уравнение энергии (1.1) при заданных граничных условиях, получаем

$$T = T_{\text{ст}} + (T_{\text{н}} - T_{\text{ст}}) \frac{y}{\delta}.$$

Плотность теплового потока q , Вт/м², поступающего в охлаждаемую стенку в соответствии с законом Фурье, определяется следующей формулой:

$$q = \lambda_{\text{к}} \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = \frac{\lambda_{\text{к}}}{\delta} (T_{\text{н}} - T_{\text{ст}}) \quad (1.3)$$

($\lambda_{\text{к}}$ — теплопроводность конденсата, Вт/(м·К)).

Согласно формуле Ньютона — Рихмана, имеем

$$q = \alpha (T_{\text{н}} - T_{\text{ст}}), \quad (1.4)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Следовательно, коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{к}}}{\delta}.$$

Решив уравнение движения (1.2), получим соотношение, описывающее распределение скорости по сечению пленки:

$$w_x = \left(y\delta - \frac{y^2}{2} \right) \frac{\rho_{\text{к}} g}{\eta_{\text{к}}}.$$

Среднюю скорость движения \bar{w}_x , м/с, в сечении x можно считать, используя формулу

$$\bar{w}_x = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_x dy = \frac{\rho_k g \delta^2}{3\eta_k}. \quad (1.5)$$

Массовый расход конденсата G , кг/с, через поперечное сечение пленки при ее единичной ширине:

$$G = \rho_k \delta \bar{w}_x = \frac{g \rho_k^2 \delta^3}{3\eta_k}.$$

Приращение расхода конденсата в сечении, отстоящем на величину dx , выражается соотношением

$$dG = \frac{g \rho_k^2 \delta^2 d\delta}{\eta_k} \quad (1.6)$$

Приращение расхода происходит вследствие конденсации пара. Пренебрегая теплотой переохлаждения конденсата относительно температуры насыщения, получаем приращение расхода

$$dG = \frac{\lambda_k (T_H - T_{ст})}{r \delta} dx, \quad (1.7)$$

где r — удельная теплота парообразования (определяется при температуре T_H).

Приравнявая соотношения (1.6) и (1.7) и используя выражения (1.3) и (1.5), имеем следующее дифференциальное уравнение:

$$\delta^3 d\delta = \frac{\lambda_k \eta_k (T_H - T_{ст})}{r g \rho_k^2} dx. \quad (1.8)$$

Результатом решения уравнения (1.8) будет выражение для вычисления толщины пленки конденсата:

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4\eta_k \lambda_k (T_H - T_{ст}) x}{\rho_k^2 g r}}.$$

Локальный коэффициент теплоотдачи α_x , Вт/(м² · К):

$$\alpha_x = \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 g r \lambda_k^3}{4\eta_k (T_H - T_{ст}) x}}. \quad (1.9)$$

Средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$, Вт/(м²·К), при конденсации пара на стенке высотой H , м, определяется интегрированием выражения (1.9) для коэффициента теплоотдачи:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{H} \int_0^H \alpha dx = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 g r \lambda_k^3}{\eta_k (T_n - T_{ст}) H}}. \quad (1.10)$$

Выражение (1.10) справедливо при ламинарном характере движения пленки конденсата с так называемой плоской поверхностью.

При значении числа Рейнольдса $Re = \frac{w \delta \rho_k}{\eta_k} \geq Re_{кр}$ на поверхности

пленки образуются волны; при этом средняя толщина пленки оказывается меньше, чем плоской, а площадь поверхности — больше. Появление волн вызывает увеличение коэффициента теплоотдачи примерно на 20 %.

При $Re = \frac{w \delta \rho_k}{\eta_k} \geq 400$ режим движения жидкости в пленке конденсата переходит в турбулентный.

Пленка конденсата весьма тонкая, и поэтому при относительно малой кривизне формулу (1.10) можно использовать и для расчета теплоотдачи при конденсации на вертикальных криволинейных поверхностях, в том числе и на вертикальных трубах.

1.2. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.2.

Экспериментальный участок 4 (конденсатор) представляет собой двуполостной цилиндр, закрытый фланцами. Вдоль оси цилиндра расположена труба из коррозионно-стойкой стали диаметром $D = 12,5$ мм, высотой $H = 370$ мм. Для измерения температуры трубы к ее поверхности приварены спаи четырех хромель-копелевых термопар 5. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду поверхность конденсатора теплоизолирована слоем асбеста и покрыта кожухом. С этой же целью слоем асбеста покрыты паропроводы. Визуальное наблюдение за процессом конденсации происходит через окно, расположенное на передней стороне экспериментального участка. Через окно, расположенное

на его задней стороне обеспечивается подсветка трубы, на поверхности которой осуществляется конденсация.

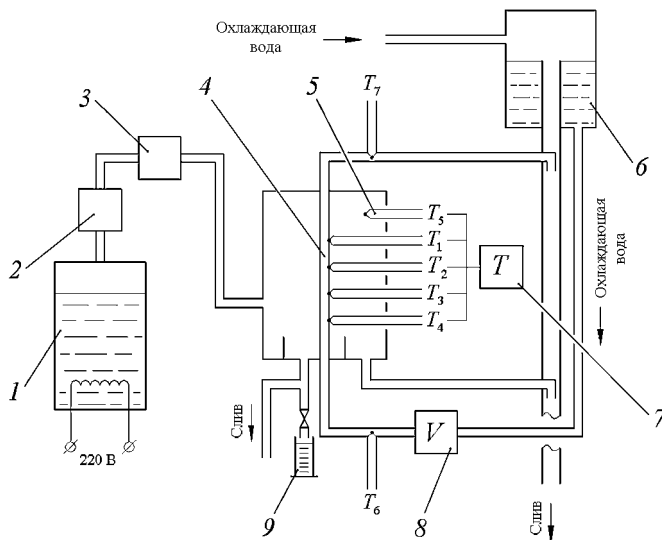


Рис. 1.2. Схема установки:

1 — парогенератор; 2, 3 — пароперегреватели; 4 — экспериментальный участок; 5 — термодатчики; 6 — бак постоянного уровня; 7 — блок измерения температуры; 8 — блок измерения расхода охлаждающей воды; 9 — колба для сбора конденсата

Водяной пар образуется в электрическом лабораторном парогенераторе 1, на выходе которого установлен сепаратор для удаления мелких капель воды. Максимальная производительность парогенератора составляет 25 кг пара в час. С целью обеспечения безопасной эксплуатации парогенератор оборудован автоматическим устройством, отключающим электропитание при достижении давления 0,11 МПа, и предохранительным клапаном, срабатывающим при давлении более 0,12 МПа. Время, необходимое для закипания свежей порции воды, составляет 45...50 мин.

Лабораторная установка оборудована пароперегревателями 2, 3, которые обеспечивают некоторый перегрев пара выше температуры насыщения (на 3...5 К). Это делается для уменьшения количества конденсата, образующегося в паропроводах.

Перегретый пар по трубопроводу подается на экспериментальный участок, где он соприкасается с холодной поверхностью трубы и конденсируется на ней. Скорость пара мала (менее 1 м/с) и не оказывает существенного воздействия на движение пленки конденсата, что позволяет считать процесс конденсации происходящим при неподвижном паре. Образовавшийся на трубе конденсат стекает вниз и поступает в мерную колбу 9 или на слив.

Вода для охлаждения трубы подается из водопровода через бак постоянного уровня 6. Ее расход регулируют с помощью вентиля и измеряют расходомером в блоке 8. В результате изменения расхода воды изменяется температура поверхности трубы. Температуру поверхности трубы, охлаждающей воды и пара измеряют с помощью хромель-копелевых термопар. Все термопары выведены на переключатель, соединяющий их с блоком измерения температуры 7.

1.3. Порядок проведения эксперимента

Опыты проводят при трех значениях расхода охлаждающей воды, что обеспечивает три различные температуры поверхности цилиндра 4 (см. рис. 1.2).

1. Последовательно открыть вентили подачи воды в бак постоянного уровня и в опытную трубу и вентиль подачи пара.

2. Пароперегреватели 2, 3 включить в последнюю очередь.

3. Перед снятием показаний приборов убедиться, что установка вышла на стационарный тепловой режим, который характеризуется постоянными во времени температурой и расходом охлаждающей воды. В процессе прогрева установки образующийся на опытной трубе конденсат поступает на слив.

4. После выхода установки на стационарный режим следует открыть трехходовой кран и направить конденсат в мерную колбу 9.

5. С помощью секундомера определить промежуток времени τ (около 120 с), за который соберется некоторое количество конденсата m_k , кг.

6. В течение этого же времени измерить температуру поверхности трубы, температуру поступающего в конденсатор пара и расход охлаждающей воды.

7. Определить атмосферное давление по барометру. Давление насыщенного пара p_n , Па, конденсирующегося на рабочем участ-

ке, принять равным атмосферному, а его температуру, равную температуре насыщения T_n , К, определить по этому давлению с помощью табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Значение температуры насыщения паров воды
в зависимости от давления**

Давление p_n , мм рт. ст.	Темпе- ратура T_n , К	Давление p_n , мм рт. ст.	Темпе- ратура T_n , К	Давление p_n , мм рт. ст.	Темпе- ратура T_n , К
720	371,64	740	372,41	760	373,15
725	371,83	745	372,59	765	373,33
730	372,03	750	372,78	770	373,52
735	372,22	755	372,97	775	373,70

8. В процессе проведения эксперимента необходимо периодически вести визуальные наблюдения за процессом конденсации. Режим конденсации должен быть пленочным. При появлении на рабочем участке капель трубу 4 следует оросить водой через воронку.

9. После окончания эксперимента выключить установку. Выключение проводить в обратном порядке.

Включение и выключение установки выполнить под наблюдением преподавателя или лаборанта.

1.4. Обработка результатов эксперимента

В результате обработки экспериментальных данных должны быть получены значения коэффициентов теплоотдачи и проведено их сравнение с соответствующими теоретическими значениями.

Экспериментальное значение среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_3$, Вт/(м²·К):

$$\bar{\alpha}_3 = \frac{Q}{F(T_n - T_{ст.сп})}, \quad (1.11)$$

где Q — тепловой поток, образующийся в результате конденсации пара, Вт; $T_{\text{ст.ср}} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4)/4$ — средняя температура поверхности конденсации, К; F — площадь поверхности конденсации, м²:

$$F = \pi DH.$$

Тепловой поток Q можно определить по количеству образовавшегося конденсата или по расходу охлаждающей воды:

$$Q = \frac{m_k r}{\tau}; \quad (1.12)$$

$$Q = V_B \rho_B c_B (T_7 - T_6), \quad (1.13)$$

где V_B — объемный расход охлаждающей воды, м³/с; ρ_B — плотность охлаждающей воды, кг/м³; c_B — удельная теплоемкость охлаждающей воды, Дж/(кг·К); T_6 и T_7 — температура охлаждающей воды на входе и выходе трубы соответственно, К. Значения плотности и удельной теплоемкости охлаждающей воды принять равными $\rho_B = 998$ кг/м³ и $c_B = 4182$ Дж/(кг·К) соответственно.

Таблица 1.2

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

Температура T_k , К	Динамическая вязкость $\eta_k \cdot 10^7$, Па·с	Теплопроводность λ_k , Вт / (м·К)	Плотность ρ_k , кг/м ³	Удельная теплота паро- образования r , кДж/кг
323,15	5440	0,643	988	2382,5
333,15	4630	0,653	983	2358,4
343,15	4005	0,662	978	2333,8
353,15	3510	0,669	972	2308,9
363,15	3113	0,675	965	2283,4
373,15	2790	0,680	958	2257,2

Теоретическое значение среднего коэффициента теплоотдачи можно определить с помощью формулы (1.10), а значения λ_k , ρ_k , η_k — по табл. 1.2 теплофизических свойств воды в жидком состоянии (конденсата) при некоторой определяющей температуре $T_{\text{опр}}$, К:

$$T_{\text{опр}} = T_{\text{ст. ср}} + 0,33(T_{\text{н}} - T_{\text{ст. ср}}).$$

По полученным результатам построить график теоретической зависимости $\bar{\alpha} = f(T_{\text{н}} - T_{\text{ст. ср}})$ (см. формулу (1.10)) и на него нанести экспериментальные значения $\bar{\alpha}_3$.

1.5. Оценка погрешностей измерений

В соответствии с расчетными зависимостями (1.11) – (1.13) максимальная среднеквадратичная ошибка косвенного измерения коэффициента теплоотдачи

$$\frac{\bar{\Delta\alpha}_3}{\bar{\alpha}_3} \cdot 100 = \left[\left(\frac{\Delta m_k}{m_k} \right)^2 + \left(\frac{\Delta r_k}{r_k} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\Delta T_{\text{ст}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{ст}}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{\text{н}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{ст}}} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100, \quad (1.14)$$

где абсолютные погрешности измерения величин в соотношении (1.14): массы конденсата $\Delta m_k = \pm 0,002$ кг; промежутка времени $\Delta \tau = \pm 0,1$ с; $\Delta T_{\text{ст}} = \pm 2,25$ К; геометрических размеров трубы $\Delta D = \pm 10^{-4}$ м, $\Delta H = \pm 10^{-3}$ м. Погрешности определения температуры насыщения $\Delta T_{\text{н}}$ и удельной теплоты фазового перехода Δr по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара весьма малы и ими в расчете можно пренебречь.

Отчет о работе должен содержать:

1) оформленный протокол, бланк которого выдается преподавателем на кафедре в начале лабораторной работы;

2) анализ полученных результатов, основанный на сравнении опытных данных с результатами расчета по теоретической зависимости.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникает конденсация?
2. Что такое пленочная и капельная конденсация?
3. При каком виде конденсации коэффициент теплоотдачи выше и почему?
4. Перечислите допущения, принятые при выводе расчетной формулы для коэффициента теплоотдачи в случае конденсации неподвижного пара на вертикальной пластине.
5. Каков характер зависимости локального коэффициента теплоотдачи от температурного напора ($T_n - T_{ст.ср}$) и расстояния от начала пластины при пленочной конденсации?
6. Каков характер зависимости коэффициента теплоотдачи от теплофизических свойств водяного конденсата: теплоты фазового перехода, вязкости, теплопроводности?
7. Назовите основные элементы экспериментальной установки.

2. Работа ТП-09. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ

Цель работы — экспериментальное определение зависимости теплового потока и коэффициента теплоотдачи от температурного напора при кипении на поверхности нагрева, находящейся в большом объеме дистиллированной воды.

2.1. Краткие теоретические сведения

Процесс теплообмена при кипении имеет очень высокую интенсивность и находит широкое применение в различных областях современной техники.

Кипение жидкости возможно во всем интервале температур между критической и тройной точками вещества. Для возникновения процесса кипения необходимы по крайней мере два условия: должны быть центры парообразования и температура жидкости должна превышать температуру насыщения. Центрами парообразования могут служить впадины на поверхности нагрева, пузырьки газа, твердые частицы в объеме жидкости и т. д.

Различают кипение в большом объеме, т. е. в условиях естественной конвекции, и при вынужденном движении жидкости. В лабораторной работе изучается теплообмен при кипении в большом объеме.

Главной характеристикой теплообмена при кипении является кривая кипения (рис. 2.1), которая отражает не только интенсивность теплообмена, но и смену характерных режимов.

Ход кривой кипения будем анализировать, мысленно проводя два эксперимента. В первом предполагается, что поверхность кипения обогревается независимым источником теплоты, например электрическим омическим нагревателем. Жидкость термостатирована при температуре насыщения. При подводе к поверхности кипения теплового потока температура жидкости начинает повышаться.

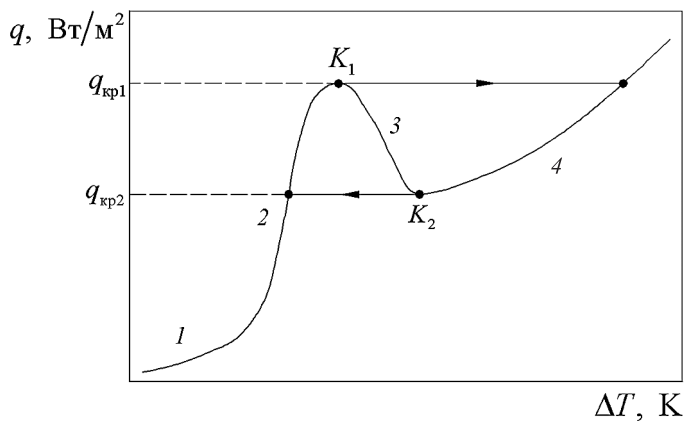


Рис. 2.1. Кривая кипения

При малых температурных напорах $\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{ж}}$ (где $T_{\text{п}}$ — температура поверхности кипения, $T_{\text{ж}}$ — температура насыщения жидкости) вблизи поверхности начинает развиваться свободно-конвективное движение, причем отвод теплоты полностью обеспечивается этим механизмом теплообмена, а парообразования не происходит. Свободная конвекция постепенно переходит из ламинарного режима в турбулентный. Эта ситуация соответствует участку 1, который, вообще говоря, не является частью кривой кипения. Дальнейший подвод теплоты вызывает появление первых пузырьков пара, число которых постепенно растет, на поверхности нагрева начинают работать центры парообразования. Паросодержание в пристенном слое становится выше, и кипение становится бурным. При этом вблизи стенки жидкость сильно турбулизирована. Эти процессы отображаются участком 2 на кривой кипения. По мере приближения к точке K_1 доступ жидкости к поверхности кипения становится все более затрудненным из-за очень интенсивного динамического воздействия паровых масс, которые начинают представлять собой крупные агломераты. Наконец, жидкость утрачивает возможность контактировать со стенкой, которая полностью покрывается паровой пленкой. При этом теплоотвод резко ухудшается, что можно объяснить перемещением границы испарения с

поверхности кипения на некоторое расстояние от нее. Это явление называют первым кризисом теплообмена при кипении. Даже небольшое увеличение теплового потока приводит к скачкообразному увеличению разности температур, т. е. к резкому повышению температуры стенки.

При первом кризисе режим пузырькового кипения сменяется пленочным кипением, когда отвод теплоты от стенки обусловлен не только конвекцией пара в пленке, но и переносом теплоты механизмом излучения. При дальнейшем увеличении плотности теплового потока наблюдается увеличение коэффициента теплоотдачи, но намного слабее, чем при пузырьковом кипении. Если начать уменьшать тепловой поток, то процесс будет отображаться той же линией пленочного кипения 4. Однако снижение плотности теплового потока до $q_{кр1}$ не приведет к возврату на линию пузырькового кипения. Пленочное кипение будет продолжаться и при более низких тепловых потоках, а установление пузырькового кипения произойдет в точке K_2 при второй критической плотности теплового потока $q_{кр2}$; это явление называют вторым кризисом теплоотдачи при кипении.

Теперь рассмотрим второй сценарий эволюции кривой кипения, когда происходит регулирование температуры поверхности, а плотность теплового потока устанавливается в соответствии с механизмом теплоотвода. Повышая температуру поверхности кипения, например обогревая ее промежуточным жидким теплоносителем, мы будем наблюдать тот же ход кривой кипения, как на участках 1 и 2, вплоть до кризиса. Последующий рост температуры поверхности, очевидно, не может привести к каким-либо скачкообразным явлениям. Однако при этом, как и в первом сценарии, произойдет смена режима теплообмена. Пузырьковый режим перейдет в режим переходного кипения, когда некоторый участок поверхности в течение определенных чередующихся промежутков времени контактирует либо с испаряющейся жидкостью, либо с паром. Переходное кипение, которое отображается линией 3, прекратится в точке второго кризиса кипения, а далее процесс отвода теплоты трансформируется в пленочное кипение. Если затем уменьшать тепловую нагрузку, процесс будет происходить по только что рассмотренному сценарию, т. е. пленочное кипение

сменится переходным, а по достижении значения $\Delta t_{\text{кр1}}$ установится пузырьковое кипение. Таким образом, при независимом обогреве поверхности кипения наблюдается явление гистерезиса.

Теплообмен при кипении на поверхности нагрева отличается замечательной особенностью, которая заключается в том, что при самых разных условиях протекания процесса выполняется следующее соотношение между коэффициентом теплоотдачи α и плотностью теплового потока q :

$$\alpha \sim q^{2/3}.$$

Теплоотдача при кипении зависит от многих факторов, причем не всегда один и тот же параметр влияет на коэффициент теплоотдачи одинаково. В зависимости от сочетания различных параметров степень влияния какой-либо величины может быть разной. В частности, разные подходы к описанию теплообмена при кипении приводят к различным формулам, в которых присутствуют комбинации теплофизических свойств кипящего вещества (жидкости и пара). Тем не менее фундаментальный закон теплообмена при кипении выполняется в большинстве практически важных случаев.

Формула (2.1) является одним из выражений, устанавливающих взаимосвязь между коэффициентом теплоотдачи и плотностью теплового потока при пузырьковом кипении:

$$\frac{\alpha \Lambda}{\lambda'} = 7 \cdot 10^{-4} \left(\frac{q \Lambda}{r \rho' v'} \right)^{0,7} \text{Pr}'^{0,35} \left[\frac{p'}{\sqrt{g \sigma (\rho' - \rho'')}} \right]^{-0,7}. \quad (2.1)$$

Здесь α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); $\Lambda = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} —$ капиллярная постоянная Лапласа, м; q — плотность теплового потока, Вт/м²; λ — теплопроводность, Вт/(м · К); Pr — число Прандтля (индекс «'» означает жидкость, а «''» — пар); p — давление, Па; r — удельная теплота парообразования Дж/кг; ρ — плотность, кг/м³; v — кинематическая вязкость жидкости, м²/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; σ — поверхностное натяжение, Н/м.

Комплекс $\frac{q\Lambda}{r\rho'v'}$, представляющий собой модифицированное число Рейнольдса, построен по скорости парообразования и постоянной Лапласа.

2.2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 2.2) представляет собой сосуд из коррозионно-стойкой стали с двойными стенками, между которыми находится теплоизоляция. Сосуд наполнен дистиллированной водой. Во время эксперимента вода находится при атмосферном давлении и поддерживается в состоянии насыщения с помощью нагревательного элемента 1. Температура воды измеряется термометром 10. Образующиеся в процессе работы установки пары на конденсаторе 8 вновь превращаются в жидкость, которая стекает обратно в объем. Сверху сосуд закрыт крышкой 9, содержащей два рабочих участка.

Первый рабочий участок предназначен для исследования пузырькового кипения на поверхности трубки. Трубка 14 (из коррозионно-стойкой стали длиной 50 мм с наружным диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,1 мм), расположенная горизонтально, герметично закрыта с обоих концов и полностью погружена в воду. В ходе эксперимента осуществляют нагрев трубки непосредственным пропусканием по ней электрического тока, параметры которого измеряют вольтметром и амперметром. Регулируемое напряжение к трубке подается через токоведущие медные стержни 15 от понижающего трансформатора 13. Температуру поверхности теплообмена измеряют с помощью термопары 11, горячий спай которой приварен к внутренней поверхности трубки. Показания термопары регистрируются самописцем типа КСП 12.

Второй рабочий участок служит для исследования теплообмена при кипении в переходном и пленочном режиме на сферической поверхности. Медный шар 2 диаметром 25 мм, закрепленный на штоке 6, предварительно разогревается в печи 7, установленной на крышке 9. В ходе эксперимента шар с помощью штока 6 опускают в воду. При этом самописец КСП 4 на движущейся диаграм-

мной ленте строит графическую зависимость температуры остывающего шара от времени. Контроль температуры шара при его нагреве в печи и вычерчивание температурной кривой при остывании в воде осуществляются по данным термопары 5. Горячий спай термопары находится в центре шара 2. Горячий

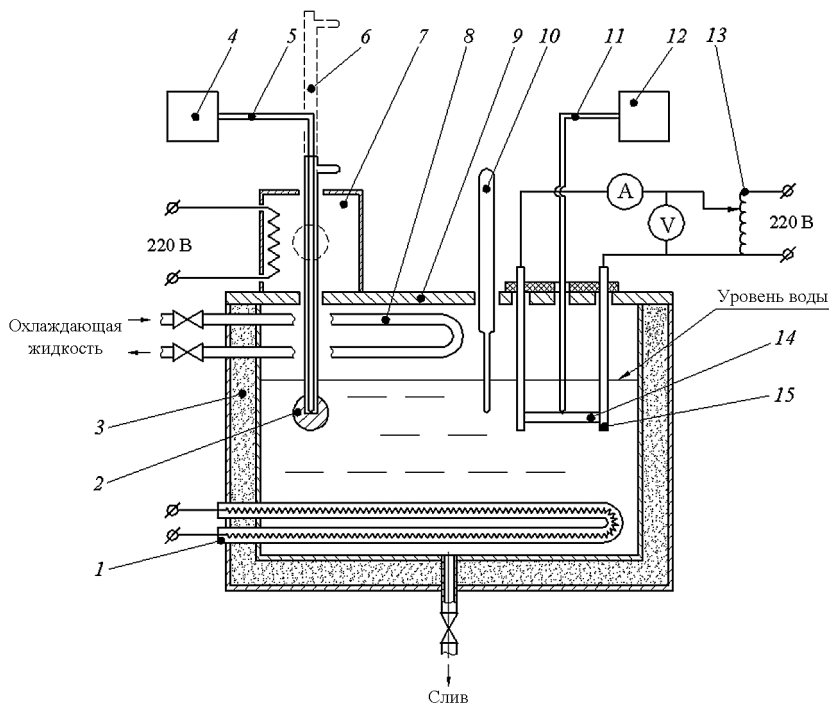


Рис. 2.2. Конструктивная схема экспериментального сосуда:

1 — трубчатый нагревательный элемент; 2 — шар; 3 — корпус; 4, 12 — самописцы; 5 — термопара для измерения температуры шара; 6 — шток; 7 — печь; 8 — конденсатор; 9 — крышка; 10 — термометр; 11 — термопара для измерения температуры трубки; 13 — лабораторный трансформатор; 14 — трубка; 15 — токо-
ведущие стержни

Для наблюдения за процессами кипения на рабочих поверхностях на задней стенке установки имеется подсвечивающая лампа, а на передней — смотровое окно.

2.3. Порядок проведения эксперимента

Подготовка к проведению эксперимента

1. Наполнить сосуд 7 установки (рис. 2.3) дистиллированной водой.

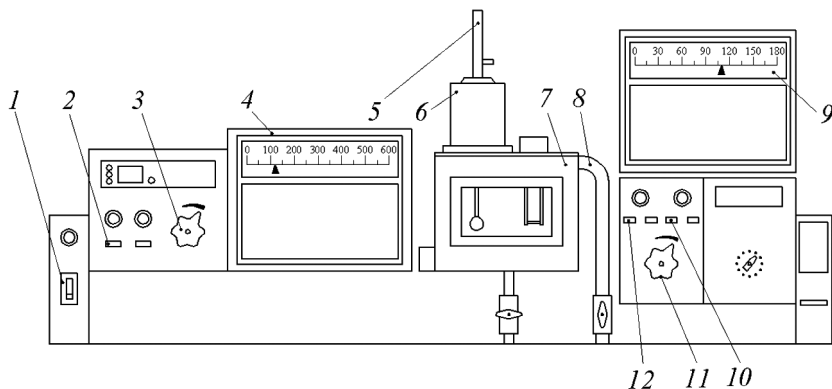


Рис. 2.3. Общий вид установки

1 — автоматический выключатель; 2 — кнопка «Нагрев трубки»; 3, 11 — ручки лабораторного трансформатора; 4, 9 — самописцы; 5 — штوك; 6 — печь; 7 — сосуд; 8 — конденсатор; 10 — кнопка «Нагрев шара»; 12 — кнопка «Нагрев воды»

2. Включить автоматический выключатель 1 на левой панели, убедившись в том, что шар для исследования пленочного кипения находится внутри печи 6.

3. Включить кнопки «Нагрев воды» 12 и «Нагрев шара» 10.

4. Повернув ручку 11 по часовой стрелке в крайнее положение, подать на теплонагревательный элемент (ТЭН) максимальное напряжение.

5. Включить систему Dry cooler, обеспечив работу конденсатора 8 водяных паров.

6. Включить самописец 4. Время нагрева шара и воды до рабочих температур составляет 60...90 мин. Температуру воды в сосуд следует контролировать по термометру, а температуру шара — по шкале самописца 4.

7. По достижении водой состояния, близкого к состоянию насыщения, снизить напряжение на ТЭНе до 150 В поворотом ручки 11 против часовой стрелки.

Исследование пузырькового кипения на поверхности трубки

1. Включить самописец 9 для определения температуры поверхности трубки.
2. Включить кнопку 2 «Нагрев трубки», убедившись в том, что ручка 3 регулирования напряжения на трубке находится в положении 0 В.
3. Плавное вращая ручку 3, установить напряжение на трубке 0,7 В, ориентируясь на показания вольтметра.
4. Амперметром определить ток нагрева трубки, а по показаниям самописца 9 — температуру поверхности трубки.
5. Измеренные параметры записать в бланк лабораторной работы.
6. Повторить измерения для значений напряжения на трубке 1,0 В и 1,3 В.
7. Отключить электропитание трубки.

Исследование пленочного кипения на поверхности шара

1. Включить кнопку «Диаграмма» на самописце 4 (при этом диаграммная лента начнет двигаться).
2. С помощью штока 5 опустить шар в воду. Самописец 4 вычертит график зависимости температуры шара от времени.
3. После прекращения кипения на шаре отключить самописец и вернуть шар в исходное положение.
4. Отключить кнопки «Нагрев воды» 12, «Нагрев шара» 10 и автоматический выключатель 1.

2.4. Обработка результатов эксперимента

Необходимо представить экспериментальные данные, полученные при кипении воды на поверхностях трубки и шара, в виде графической зависимости плотности теплового потока, отводимого жидкостью, от температурного напора (кривая кипения), а также вычислить коэффициенты теплоотдачи для каждого режима.

Ниже приведен порядок обработки экспериментальных данных.

Исследование кипения на поверхности трубки

1. Определить электрическую мощность Q , Вт, потребляемую трубкой, с помощью закона Джоуля — Ленца:

$$Q = UI,$$

где U — напряжение нагрева трубки, В; I — ток нагрева трубки, А.

2. Вычислить плотность q , Вт/м², теплового потока, отводимого от трубки. Поступление теплоты на токоподводящие стержни пренебрежимо мало, поэтому при определении плотности теплового потока всю тепловую мощность, выделяемую трубкой, относят к площади $F_{\text{тр}}$ контакта трубки с водой:

$$q = \frac{Q}{F_{\text{тр}}}.$$

3. По результатам данного эксперимента определить температурный напор Δt_3 , °С:

$$\Delta t_3 = t_{\text{п}} - t_{\text{в}},$$

где $t_{\text{п}}$ — температура поверхности кипения, °С; $t_{\text{в}}$ — температура воды в сосуде, °С.

4. Рассчитать значения коэффициента теплоотдачи α_3 , Вт/(м² · К), соответствующие Δt_3 :

$$\alpha_3 = \frac{q}{\Delta t_3}.$$

5. Вычислить теоретическое значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{т}}$, Вт/(м² · К), по формуле (2.1). Подставляя в формулу (2.1) значения параметров воды и водяного пара на линии насыщения, а также значения других величин, соответствующих условиям эксперимента, можно получить следующее выражение:

$$\alpha = 4,17q^{2/3}.$$

6. Рассчитать значения температурного напора $\Delta t_{\text{т}}$, °С, соответствующие коэффициенту $\alpha_{\text{т}}$:

$$\Delta t_{\text{т}} = \frac{q}{\alpha_{\text{т}}}.$$

7. Сравнить значения коэффициентов теплоотдачи, полученных в п. 4 и 5. В логарифмических координатах построить прямую, соответствующую уравнению (2.1), по данным п. 6 и 2, и нанести экспериментальные точки по данным п. 2 и 3.

Исследование кипения на поверхности шара

Для построения кривой кипения воды на поверхности шара необходимо расшифровать диаграмму, полученную с помощью самописца. Линия на ленте самописца представляет собой графическую зависимость температуры шара от времени. На этом графике задают оси координат. Время отсчитывают по горизонтальной оси от момента погружения шара в воду (точка *A* на рис. 2.4). Ось температур проводят вертикально. Температуру шара t , °C, в любой выбранной точке *N* графика вычисляют по формуле

$$t = \mu_t l_t, \quad (2.2)$$

где l_t — координата точки *N* по оси температур, мм; $\mu_t = 2,4$ °C/мм — масштабный коэффициент оси температур (диапазон значений шкалы прибора 0...600 °C на длине 250 мм).

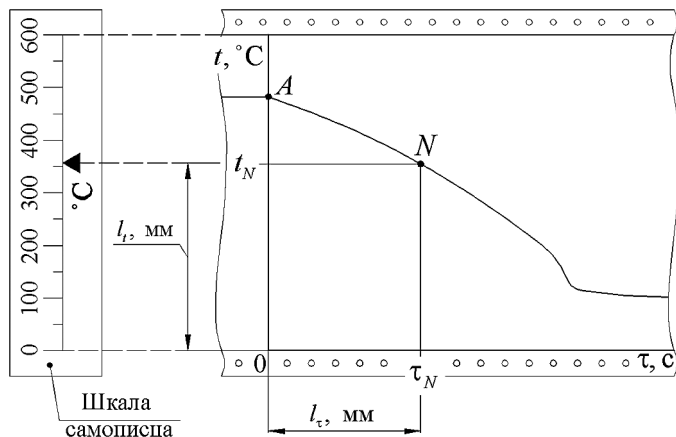


Рис. 2.4. Задание координатных осей на диаграмме остывания шара

Время τ_N , с, соответствующее точке N , определяют по известной скорости движения диаграммной ленты во время эксперимента $w = 13 \text{ мм/с}$:

$$\tau = \mu_\tau l_\tau, \quad (2.3)$$

где $\mu_\tau = w$ — масштабный коэффициент оси времени; l_τ — координата точки N по оси времени, мм.

Плотность теплового потока от поверхности шара можно найти, используя формулу

$$dQ = cm dT, \quad (2.4)$$

где Q — количество теплоты, отводимое от поверхности шара, Дж; c — удельная массовая теплоемкость материала шара, Дж/(кг · К); m — масса шара, кг; T — температура шара, К. Полагают, что шар в любой момент времени прогрет равномерно, т. е. измеряемая температура в его центре равна температуре поверхности. Это предположение можно сделать исходя из того, что теплопроводность меди велика, радиус шара и коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении малы, а значит, мал и критерий Био.

Разделив обе части уравнения (2.4) на выражение $F_{\text{ш}} d\tau$, получают

$$\frac{dQ}{F_{\text{ш}} d\tau} = \frac{cm}{F_{\text{ш}}} \frac{dT}{d\tau}, \quad (2.5)$$

где $F_{\text{ш}}$ — площадь поверхности теплообмена шара, $F_{\text{ш}} = 4\pi R_{\text{ш}}^2$.

Плотность теплового потока от шара $q_{\text{ш}}$, Вт/м²:

$$q_{\text{ш}} = \frac{dQ}{F_{\text{ш}} d\tau}.$$

Тогда из выражения (2.5) следует

$$q_{\text{ш}} = \frac{cm}{F_{\text{ш}}} \frac{dT}{d\tau}. \quad (2.6)$$

Выразив массу шара как

$$m = \rho V_{\text{ш}}, \quad (2.7)$$

где ρ — плотность материала шара (медь $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$);

$V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{ш}}^3$ — объем шара, м^3 ; $R_{\text{ш}} = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ — радиус шара) и

подставив выражение (2.7) в формулу (2.6), получают

$$q_{\text{ш}} = c\rho \frac{V_{\text{ш}}}{F_{\text{ш}}} \frac{dT}{d\tau}. \quad (2.8)$$

Результатом подстановки в формулу (2.8) выражений для вычисления объема и площади поверхности шара будет уравнение

$$q_{\text{ш}} = \frac{1}{3} R_{\text{ш}} c\rho \frac{dT}{d\tau}.$$

В ходе обработки данных находят производную $dT/d\tau$ как отношение конечных разностей $\Delta T/\Delta\tau$ на каждом из 10 выделенных участках графика. Для этого на графике находят интервал BC (рис. 2.5), где температура шара убывает наиболее быстро.

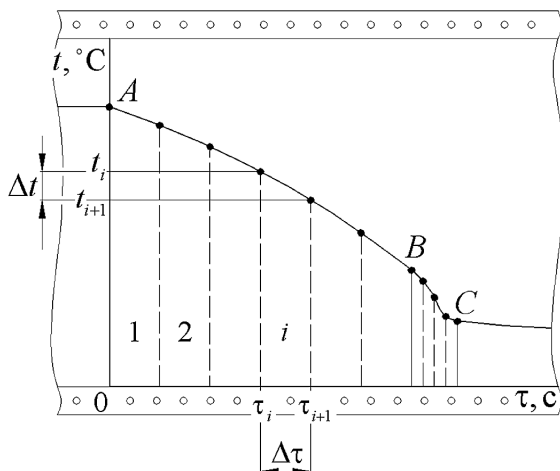


Рис. 2.5. Разбиение графика изменения температуры шара на интервалы

Область под графиком на этом интервале разбивают вертикальными линиями на четыре равных по ширине участка. Аналогично область между точками A и B делят на шесть частей. Координаты получившихся 10 точек разбиения графика, измеренные в миллиметрах (l_t и l_τ), записывают в протокол лабораторной работы, который выдается на кафедре. По формулам (2.2) и (2.3) определяют время и температуру шара в этих точках. Далее вычисляют длительность интервала времени $\Delta\tau$, с, и изменение температуры Δt , °C, на каждом участке разбиения:

$$\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i,$$

$$\Delta t = \Delta T = t_{i+1} - t_i,$$

где τ_i , τ_{i+1} , t_i , t_{i+1} — время и температура в начале и конце каждого интервала соответственно.

Средняя за интервал времени $\Delta\tau$ температура шара $t_{\text{ср}}$, °C, вычисляется как

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_i + t_{i+1}}{2}.$$

Удельная массовая теплоемкость меди c , Дж/(кг·К), является функцией температуры:

$$c = 3,55 \cdot 10^2 + 0,107(t + 273).$$

Теплоемкость на выделенном участке определяют по температуре $t_{\text{ср}}$.

По найденным значениям $\Delta\tau$ и Δt вычисляют отношение $\Delta T/\Delta\tau$ и среднюю плотность теплового потока $q_{\text{ср}}$, Вт/м², на каждом из 10 выделенных участков по следующей формуле:

$$q_{\text{ср}} = \frac{1}{3} R_{\text{ш}} c \rho \frac{\Delta T}{\Delta\tau}.$$

Средний температурный напор

$$\Delta T_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{ср}} = t_{\text{ср}} - t_{\text{в}}.$$

Чтобы оценить интенсивность теплообмена, определяют средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$, Вт/(м²·К), за каждый интервал времени Δt :

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{q_{\text{ср}}}{\Delta t_{\text{ср}}}.$$

В протоколе лабораторной работы на логарифмической координатной сетке рядом с нанесенными ранее точками, отражающими процессы кипения на трубке, добавить 10 точек по вычисленным значениям $\Delta T_{\text{ср}}$ и $q_{\text{ср}}$ на шаре. Отметить параметры $\Delta T_{\text{кр}}$ и $q_{\text{кр}}$ первого кризиса кипения.

Контрольные вопросы

1. Что называют первой критической плотностью теплового потока?
2. Перечислите условия, необходимые для возникновения процесса кипения.
3. Какие режимы кипения существуют?
4. Что такое гистерезис кривой кипения?
5. Почему коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении меньше, чем при пузырьковом?
6. Что называют второй критической плотностью теплового потока?
7. Могут ли сосуществовать на поверхности нагрева пузырьковый и пленочный режимы кипения?

3. Работа ТП-15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Цель работы — ознакомление с принципом действия тепловой трубы, экспериментальное определение эффективной теплопроводности тепловой трубы.

3.1. Краткие теоретические сведения

На рис. 3.1 показана схема тепловой трубы — устройства, предназначенного для переноса теплоты при минимальных разностях температур.

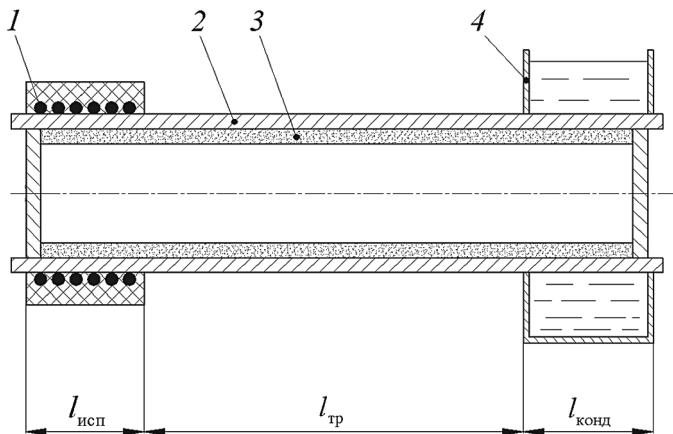


Рис. 3.1. Схема тепловой трубы:

1 — нагреватель; 2 — корпус; 3 — фитиль; 4 — холодильник; $l_{\text{исп}}$ — длина зоны испарения; $l_{\text{тр}}$ — длина транспортной зоны; $l_{\text{конд}}$ — длина зоны конденсации

Тепловая труба представляет собой герметичное теплопередающее устройство, в котором перенос теплоты осуществляется с помощью заправленного внутрь тепловой трубы теплоносителя, претерпевающего фазовые переходы — испарение и конденсацию.

Жидкая фаза теплоносителя пропитывает пористый фитиль и удерживается в нем за счет действия сил поверхностного натяжения. Подвод теплоты осуществляется на части длины тепловой трубы, которая называется зоной испарения, так как в этой зоне происходит испарение жидкости. Отвод теплоты осуществляется на части длины тепловой трубы, которая называется зоной конденсации, так как в этой зоне происходит конденсация пара. Между зонами испарения и конденсации расположена транспортная зона, которую иногда называют адиабатной зоной.

Принцип работы тепловой трубы состоит в следующем. При подводе теплоты от нагревателя I к корпусу тепловой трубы температура зоны испарения длиной $l_{\text{исп}}$ увеличивается, теплота механизмом молекулярной теплопроводности передается через корпус, что приводит к нагреванию пористого фитиля и удерживаемой в нем жидкости. Жидкость начинает испаряться с поверхности менисков, образованных структурой фитиля. Возникает разность давлений

$$(p_{\text{п}} - p_{\text{ж}})_{\text{исп}} = \frac{2\sigma}{R_{\text{исп}}},$$

где $p_{\text{п}}$ — давление пара над мениском, Па; $p_{\text{ж}}$ — давление жидкости под мениском, Па; σ — поверхностное натяжение, Н/м; $R_{\text{исп}}$ — радиус кривизны мениска в зоне испарения, м.

Образовавшийся пар начинает двигаться из зоны испарения, проходит транспортную (адиабатную) зону и поступает в зону конденсации. Тепловые потоки в зоне конденсации направлены наружу, где находится холодильник 4. На менисках в зоне конденсации возникает разность давлений

$$(p_{\text{п}} - p_{\text{ж}})_{\text{конд}} = \frac{2\sigma}{R_{\text{конд}}},$$

где $R_{\text{конд}}$ — радиус кривизны мениска в зоне конденсации, м.

В силу того, что на поверхности мениска в зоне испарения происходит унос массы, а на поверхности мениска в зоне конденсации — приток массы, радиус кривизны мениска в зоне испарения меньше радиуса кривизны мениска в зоне конденсации: $R_{\text{исп}} < R_{\text{конд}}$. Следовательно, давление жидкости в зоне испарения ниже, чем в зоне конденсации. Возникает напор, в результате жидкость движется по фитилю из зоны конденсации в зону испарения. Таким образом, в тепловой трубе осуществляется замкнутый цикл движения теплоносителя.

Это означает, что жидкость должна двигаться под действием некоторого перепада, который называется движущим. Поскольку при движении среды происходят потери давления на трение и на преодоление действия массовых сил, можно записать

$$(\Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}})_{\text{ж}} + \Delta p_{\text{п}} = 2\sigma \left(\frac{1}{R_{\text{исп}}} + \frac{1}{R_{\text{конд}}} \right),$$

где $(\Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}})_{\text{ж}}$ — потери давления жидкости на трение и на преодоление действия массовых сил, Па; $\Delta p_{\text{п}}$ — потери давления пара над мениском, Па.

При несоблюдении последнего условия произойдет высыхание фитиля и тепловая труба перестанет работать.

Тепловая мощность Q , Вт, передаваемая тепловой трубой, определяется скрытой теплотой парообразования рабочей жидкости и ее массовым расходом:

$$Q = mr,$$

где m — массовый расход рабочей жидкости (теплоносителя), кг/с; r — скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Чтобы охарактеризовать эффективность теплопереноса с помощью тепловой трубы, вводят эффективную теплопроводность $\lambda_{\text{эф}}$, Вт/(м·К), формально определив ее в виде

$$\lambda_{\text{эф}} = -\frac{Q}{A \text{ grad } T},$$

где A — площадь поперечного сечения тепловой трубы, м²; $\text{grad } T$ — продольный градиент температуры, К/м.

3.2. Области применения тепловых труб

Тепловые трубы классифицируют по температурному диапазону:

- 1) 4...110 К; теплоносители: гелий, азот, кислород; теплопередающая способность низкая; области применения крайне ограничены;
- 2) 230...500 К; теплоносители: аммиак, фреоны, спирты, вода; теплопередающая способность высокая; основные области применения — аэрокосмическая техника, системы обеспечения жизнедеятельности и системы терморегулирования космических аппаратов;
- 3) 700...1500 К; теплоносители: жидкие щелочные металлы (калий, натрий, литий); область применения — охлаждение коллекторов термоэмиссионных преобразователей энергии;
- 4) свыше 1500 К; теплоносители: барий (до 1900 К), свинец (до 2100 К), серебро (до 2600 К); области применения — высокотемпературные ядерные реакторы.

3.3. Ограничения теплопередающей способности тепловой трубы

Основные ограничения теплопередающей способности тепловой трубы определяются:

капиллярным давлением, создаваемым пористым фитилем; при повышении подводимой тепловой нагрузки требуется увеличение массового расхода теплоносителя, а капиллярный насос может не справиться с этим;

звуковым пределом для скорости пара; при высоких тепловых нагрузках скорость пара возрастает и может достичь скорости звука, при которой в непрофилированном канале возникает эффект звукового запираания;

предельным тепловым потоком в зоне испарения; при высоком тепловом потоке в зоне испарения может произойти высыхание мениска, что приводит к прекращению поступления жидкости и к выходу температуры тепловой трубы за пределы заданного температурного диапазона.

3.4. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.2.

Тепловая труба имеет размеры, мм:

Длина500
 Наружный диаметр20
 Длина зоны испарения100
 Длина зоны конденсации100

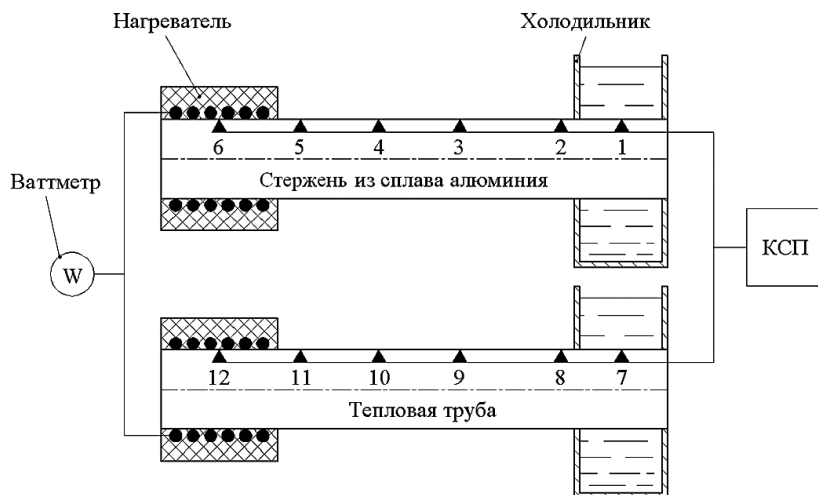


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки

Стержень из алюминиевого сплава имеет те же длину и наружный диаметр.

С одной стороны тепловая труба и стержень вставлены в омический нагреватель, мощность которого Q , Вт, измеряется ваттметром. Нагреватель имеет две одинаковые электрические спирали, поэтому мощность нагревателя, расходуемая на нагрев тепловой трубы и стержня, равна $Q/2$. С другой стороны концы тепловой трубы и стержня помещены в холодильник, представляющий собой резервуар с охлаждающей водой. На их внешней поверхности вдоль оси установлено по шесть хромель-копелевых термопар. Отсчет координаты, мм, ведется от границы зон нагрева и адиабатных зон:

Термопары	1, 7	2, 8	3, 9	4, 10	5, 11	6, 12
Координата	340	280	180	100	30	–50

Показания термопар регистрируются самопишущим 12-канальным потенциометром типа КСП и отмечаются на движущейся диаграммной ленте в виде пронумерованных точек. Номера точек совпадают с номерами термопар.

3.5. Порядок проведения эксперимента

1. Включить КСП при скорости подачи диаграммной ленты 600 мм/ч.
2. Включить нагреватель на мощность $Q = 80$ Вт.
3. Через 20 мин залить в холодильники холодную воду.
4. Через 10 мин выключить КСП, нагреватель и установку.
5. Снять построенную диаграмму температур с КСП.

3.6. Обработка результатов эксперимента

1. Построить профили температур по длине тепловой трубы и стержня и определить значения средних градиентов температуры по их длине.

Пересчет делений шкалы на диаграмме в температуру t , °С, следует вести по формуле

$$t = 0,6x_t,$$

где x_t — координата точки на диаграмме, мм.

Определить градиенты температур вдоль стержня и тепловой трубы, используя метод наименьших квадратов. Зависимость температуры от координаты по длине трубы имеет вид (рис. 3.3)

$$t = \alpha + \beta x,$$

где x — координата горячего спая термопары.

Для нахождения коэффициентов α и β составляют систему уравнений

$$\sum_1^n t_i = n\alpha + \beta \sum_1^n x_i,$$
$$\sum_1^n x_i t_i = \alpha \sum_1^n x_i + \beta \sum_1^n x_i^2.$$

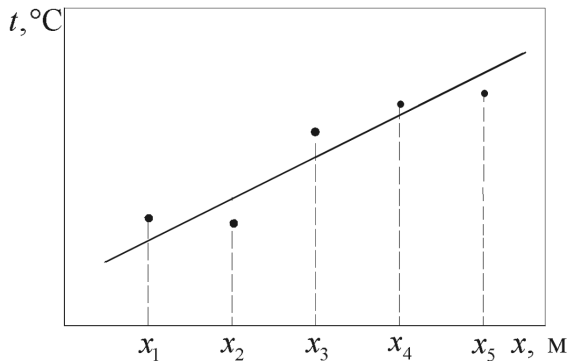


Рис. 3.3. Определение градиента температуры методом наименьших квадратов

Решение этой системы имеет вид

$$\alpha = - \frac{\left(\sum_1^n x_i t_i \right) \left(\sum_1^n x_i^2 \right) - \left(\sum_1^n x_i \right) \left(\sum_1^n x_i t_i \right)}{n \left(\sum_1^n x_i^2 \right) - \left(\sum_1^n x_i \right)^2},$$

$$\beta = \frac{n \left(\sum_1^n x_i t_i \right) - \left(\sum_1^n x_i \right) \left(\sum_1^n t_i \right)}{n \left(\sum_1^n x_i^2 \right) - \left(\sum_1^n x_i \right)^2}.$$

Коэффициент α равен значению t при $x = 0$, а β есть искомый градиент температуры $\frac{\partial t}{\partial x}$. Для данной экспериментальной установки число точек измерения температуры равно 5 и для стержня из сплава алюминия, и для тепловой трубы (показания термопар 6 и 12 при обработке результатов не рассматриваются). Далее вычисляют коэффициенты α и β :

$$\alpha = -0,245t_1 - 0,0718t_2 + 0,217t_3 - 0,449t_4 + 0,651t_5,$$

$$\beta = 2,39 \cdot 10^{-3}t_1 + 1,46 \cdot 10^{-3}t_2 - 9,32 \cdot 10^{-5}t_3 - 1,34 \cdot 10^{-3}t_4 - 2,43 \cdot 10^{-3}t_5.$$

2. Определить плотности тепловых потоков q , Вт/м², передаваемых тепловой трубой и стержнем:

$$q = \frac{4}{\pi D^2} \frac{Q}{2},$$

где D — наружный диаметр тепловой трубы, м.

3. Найти среднюю температуру стержня \bar{t} , °С, используя полученные значения коэффициентов α и β . Для усреднения следует применить формулу

$$\bar{t} = \frac{1}{x_1 - x_5} \int_{x_5}^{x_1} (\alpha + \beta x) dx.$$

4. Вычислить среднюю теплопроводность стержня λ_{Al} , Вт/(м·К), по температуре \bar{t} , используя следующую зависимость:

$$\lambda_{Al}(t) = -4,52 \cdot 10^{-4}t^2 + 2,63 \cdot 10^{-1}t + 1,59 \cdot 10^2.$$

5. Рассчитать эффективную теплопроводность тепловой трубы

$$\lambda_{эф} = \lambda_{Al} \frac{\left(\left| \frac{\partial t}{\partial x} \right| \right)_{ст}}{\left(\left| \frac{\partial t}{\partial x} \right| \right)_{т.т}},$$

где $\left(\left| \frac{\partial t}{\partial x} \right| \right)_{ст}$ — градиент температуры вдоль стержня, К/м; $\left(\left| \frac{\partial t}{\partial x} \right| \right)_{т.т}$ — градиент температуры вдоль тепловой трубы, К/м.

6. Проанализировать полученные результаты, сравнив эффективную теплопроводность тепловой трубы с теплопроводностью стержня.

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловая труба?
2. За счет чего жидкость движется в тепловой трубе из зоны конденсации в зону испарения?
3. Перечислите ограничивающие факторы теплопередающей способности тепловой трубы.
4. Возможна ли работа тепловой трубы в условиях невесомости?

ЛИТЕРАТУРА

Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: пер. с англ. М.: Энергия, 1979.

Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981.

Лабораторный практикум по технической термодинамике и теории тепломассообмена: учеб. пособие / под ред. В.И. Крутова, и Е.В. Шишова. М.: Высш. шк., 1988.

Теория тепломассообмена: учебник / под ред. А.И. Леонтьева. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
1. Работа ТП-08. Исследование теплоотдачи при конденсации водяного пара.....	4
2. Работа ТП-09. Исследование теплообмена при кипении воды в большом объеме.....	15
3. Работа ТП-15. Исследование эффективной теплопроводности тепловой трубы.....	29
Литература.....	38

Учебное издание

Морской Дмитрий Николаевич
Школа Виктор Васильевич

**Методические указания
к выполнению лабораторных работ
по курсу «Теплофизика двухфазных сред»**

Редактор *Г.А. Нилова*
Художник *А.С. Ключева*
Корректор *Н.А. Фетисова*
Компьютерная верстка *Г.Ю. Молотковой*

В оформлении использованы шрифты студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 16.12.2014. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100 экз. Изд. № 113-2014. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com